

# 花卉废物和牛粪联合堆肥中的氮迁移

张相锋,王洪涛,周辉宇,张义安,聂永丰(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

**摘要:**以花卉废物和牛粪为原料,进行了温度反馈的通气量控制联合堆肥中的氮迁移中试研究.采用自制的静态好氧床进行一次发酵,过程控制采用温度反馈通气量控制方法,发酵周期 20d;采用周期性翻堆进行物料二次腐熟,腐熟周期 40d.研究了堆肥过程中总氮、有机氮、无机氮、氨氮、硝氮等氮素形态转化随时间的变化特征及温度反馈的通气量控制对氮迁移的影响.结果表明:堆肥初期的氨化作用和反硝化作用显著,氮素总量损失累计达 41.98%,其中主要是有机氮的损失,99.95%的氮损失发生在一次发酵阶段;氮素损失主要是在 pH 和温度较高条件下的氨气大量挥发造成的.对通风进行有效控制,提高物料 C/N 及添加酸性物质有望减少 N 损失.对于 C/N 较低,硝态氮含量较高的物料堆肥,  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 0.04\%$ ,  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^- \leq 0.16$  不能作为腐熟度指标.

**关键词:**花卉废物;牛粪;联合堆肥;氮迁移;温度反馈的通气量控制

中图分类号:X712 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)03-06-0126

## Nitrogen Transformation During Co-composting of Flower Wastes and Cattle Manure

Zhang Xiangfeng, Wang Hongtao, Zhou Huiyu, Zhang Yian, Nie Yongfeng(Dept. of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Nitrogen transformation during co-composting of flower wastes and cattle manure were studied in pilot scale. The first stage was aerobic static bed of composting based on temperature feedback and control via aeration rate regulation, which lasted about 20d. The second stage was window composting, with a period of about 40d. Changes of composting of total nitrogen (TN), organic nitrogen, inorganic nitrogen,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  were studied. Results show that ammoniation and denitrification were serious at the beginning of first stage. The total nitrogen losses was about 41.98% during 60 days of composting, most of which was losses of organic nitrogen contributing about 99.95% at first stage. Losses of N were governed mainly by volatilization of ammonia as the pile temperatures and pH values were high. It is hoping to reduce nitrogen losses by effective aeration rate regulation, improving C/N of raw materials and addition of acidic amendment. On the part of material of low C/N and high nitrate, it is not appropriate for  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 0.04\%$  and  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^- \leq 0.16$  as maturity indicators.

**Keywords:** flower wastes; cattle manure; co-composting; temperature feedback and control via aeration rate regulation; total nitrogen (TN);  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ;  $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$

随着环境保护法规越来越严格,堆肥作为一种有效的有机废物资源化技术正在引起人们越来越多的兴趣.然而,对于富含氮素的物料,如源头分离的生活垃圾、牲畜粪便、污泥等,堆肥过程中可能引起氨态氮的挥发和硝态氮的反硝化,造成的气态氮损失达 43%~70%<sup>[1~3]</sup>. 含氮气体的逸出会造成植物养分的损失及大气污染.采用温度反馈的通气量控制工艺可以有效控制堆肥过程,实现有机底物的快速稳定和去除水分,但采用该工艺对堆肥氮损失的影响研究尚未见报道.相比生活垃圾和污泥而言,牲

畜粪便和花卉秸秆有机质及养分含量更高,几乎不含杂质,其堆肥产品的农用价值更大.本研究以花卉废物和奶牛场牛粪为试验原料,采用温度反馈通气量控制静态好氧堆肥技术,从中试的水平上研究了堆肥过程中总氮、有机氮、无机氮、氨氮、硝氮等氮素形态转化随时间的变化特征及温度反馈的通气量控制对氮迁移的影

基金项目:国家重大科技攻关项目(K99-05-35-02)

作者简介:张相锋(1973~),男,博士研究生,主要从事固体废物污染控制与资源化技术研究.

收稿日期:2002-05-22;修订日期:2002-06-28

响.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选择康乃馨废弃植株和奶牛场牛粪作为试验原料.康乃馨废弃植株采用爪式粉碎机破碎到粒径小于 50 mm 后作为骨料和牛粪人工混合均匀后作为试验的初始物料.试验原料的基本

物理化学指标见表 1.前期的试验研究表明,合适的初始物料含水率是堆肥的关键因素之一,采用 65 % ~ 75 % 的初始物料含水率在堆肥过程中不需添加水分即可实现成功堆肥.康乃馨:牛粪为 50: 50( W/ W) 可以使混合物料初始水分保持在 70 % 左右,作为本次中试的物料配比.

表 1 试验材料性质

Table 1 Properties of experimental materials

| 物料   | 有机质/ % | 粒径/ mm | 灰分/ % | 含水率/ % | C/ % | N/ % | C/ N | P/ % | K/ % |
|------|--------|--------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| 康乃馨  | 80     | < 50   | 20    | 65     | 60   | 1.5  | 40   | 1.2  | 2.5  |
| 牛 粪  | 70     |        | 30    | 75     | 30   | 2    | 15   | 0.6  | 1.4  |
| 初始物料 | 75     | < 50   | 25    | 70     | 45   | 1.75 | 27.5 | 0.9  | 1.95 |

1.2 堆肥过程

堆肥过程一般为二阶段发酵.第一阶段为高温快速发酵阶段,在适当的过程控制条件下,好氧微生物得到充足供氧和适当水分、养分,实现有机物料的快速分解;第二阶段为腐熟阶段,主要完成有机物料的腐殖化作用<sup>[4]</sup>.研究表明,堆肥过程中,不同的温度段微生物的量和种类有很大差异,一次发酵阶段,温度分布一般在 40 ℃ ~ 70 ℃,其中 55 ℃ ~ 60 ℃ 微生物的生物量和种类最为丰富,降解速率最大,70 ℃ 时微生物种类很少,但杀灭致病菌的效果最好<sup>[5]</sup>.

堆肥过程控制主要发生在一次发酵阶段,有固定通气量、温度反馈的通气量控制、氧浓度反馈的通气量控制及温度和氧浓度联合反馈的通气量控制 4 种形式.其中,基于温度反馈的通气量控制的控制条件简单、成本低,通过控制温度可以把一次发酵分为升温期、灭菌期、最大降解期、降温期几个阶段,在灭菌期实现致病菌的杀灭,在最大降解期实现物料的最大降解,可以实现堆肥物料的水分快速去除与有机物的生物稳定<sup>[6,7]</sup>.

本研究采用二阶段发酵.其中,一次发酵采用自行设计的静态好氧床,床体容量为 2 m<sup>3</sup>,床深 1 m,平面为 2 m × 1 m,发酵时间 15 d,堆体的上下面各覆盖 10 cm 的锯末作为保温层,其中上层锯末还起到吸附堆肥气体的作用,供风采用离心风机正压间歇式鼓风.一次发酵过程控制

采用基于温度反馈的通气量手动控制,图 1 给出了本次中试一次发酵阶段理想控制条件下的堆体温度变化曲线<sup>[6]</sup>.在堆肥初期,待温度升高到 65 ℃ 左右,通过调节风门将堆体温度控制在第一温度段(65 ℃ ~ 70 ℃),保持此温度段 1 ~ 3 d,达到彻底杀灭病原菌的目的;然后,调节进风量,使堆体温度保持在第二温度段(50 ℃ ~ 60 ℃),使堆体物料在较多的微生物作用下快速降解,在一次发酵完成前 3 天采用固定通气速率的方法使堆体温度在 2 ~ 3 d 内下降到 40 ℃ 左右.二次发酵采用条垛式,堆高约 50 cm,每周翻堆一次,发酵时间 40 d.

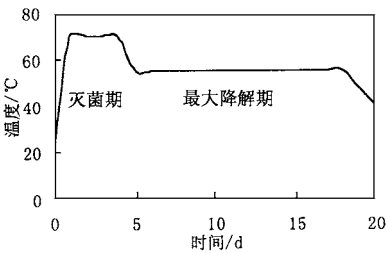


图 1 一次发酵阶段理想控制条件下堆体温度的变化  
Fig.1 Changes of temperature in piles under perfect control at first stage of composting

1.3 试验方法

测温采用热电偶式温度传感器,测温点位于堆体的竖向中心,在平面上的左、中、右布置 3 个传感器,每天测试 3 次,取平均值作为当天的堆体温度.根据不同堆肥阶段对温度的要求

人工调节供风量,使堆肥过程尽可能在理想状态下运行.通气量的测定采用转子流量计.含水率采用 105℃烘 24h 至恒重;有机质为 Muffle 炉 550℃灼烧 10h 至恒重;pH 值[ 物料:去离子水=1:10( W/ V )]用 pH 计测试;总氮采用修正凯氏法测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用 1 mol/L KCl 振荡 1h 浸提后,先用快速滤纸过滤,再用 0.45μm 滤膜过滤后,用紫外分光光度计测试<sup>[2]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中堆体温度和通气量的变化

堆体温度升高是微生物代谢产热累积的结果,反过来又决定了微生物的代谢活性<sup>[5]</sup>.在堆肥一次发酵阶段,基于温度反馈的通气量控制中,温度随通气量的变化见图 2.从图 2 可以看出,在堆肥开始 24h 内,在通气量为 30 m<sup>3</sup>/h 的情况下,堆体温度仅从 12℃上升到 28℃,后来通过降低通气量温度迅速升高到 50℃以上,在第 6 天达到最高 69℃并保持 2d,此后再通过调整通气量,将堆体温度控制在 50℃~60℃,在一次发酵前 3 天,保持通气量为 10 m<sup>3</sup>/h 不变,直到一次发酵完成,堆体温度下降到 40℃左右.一次发酵期间堆体温度在 55℃以上的天数

为 10d,可以满足杀灭致病菌的要求<sup>[8]</sup>.对比图 2 和图 1 可以看出,一次发酵实际堆体温度的变化的趋势和理想温度曲线基本一致,但仍不够精细:堆体应在发酵的 1~2d 内温度达到 65℃~70℃,实际的温度在第 5 天达到;灭菌期理论上保持 1~3d,而实际保持了 4d;实际发生的最大降解期堆体温度围绕 55℃变化的趋势不明显.这需要开发温度反馈的堆肥过程通气量自动控制系统,进一步提高控制精度.

一次发酵完成后,将物料从发酵床内人工取出,在混凝土硬化的地面上进行二次发酵.二次发酵通过翻堆再次混合物料,改善了堆体发酵的空间不均匀性,同时起到通气作用,导致翻堆后温度有不同程度的回升,随着发酵的进行,物料越来越稳定,温度回升的幅度越来越小,最终堆体温度稳定在 30℃,接近环境温度.

2.2 堆肥过程中物料有机质、水分、pH 值的变化

本次试验中,堆肥物料中有机质降解、水分去除和 pH 随发酵时间的变化见图 3.从图 3 可以看出,物料有机质含量从最初的 73.1%,经一次发酵完成时下降为 57.3%,在二次发酵中有机质含量没有明显变化.这说明牛粪和康乃

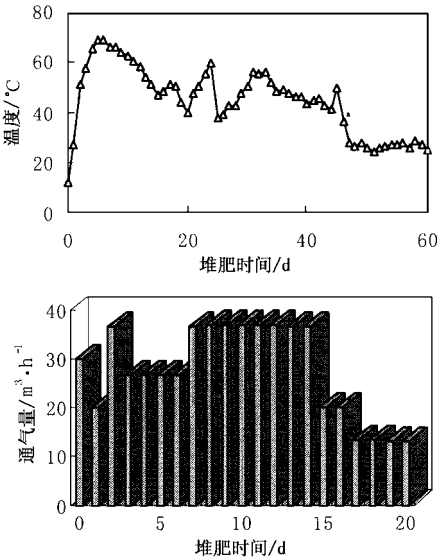


图 2 堆肥 60d 中温度和通气量的变化

Fig.2 Changes of temperature and aeration rate of piles during 60d composting process

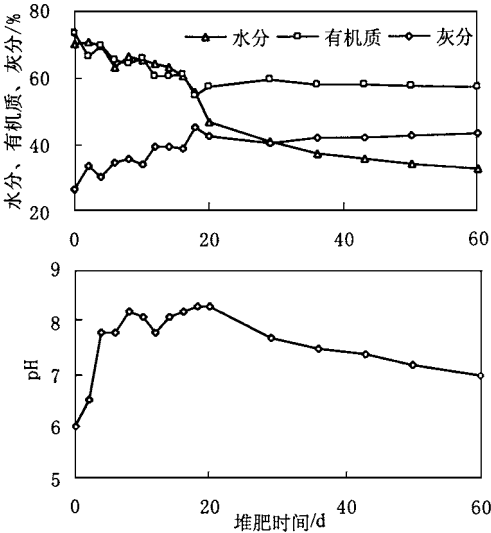


图 3 堆肥 60d 中水分、有机质、灰分和 pH 值的变化

Fig.3 Changes of moisture content, organic matter, ash content and pH value of piles during a 60d composting process

馨废物联合堆肥时,采用温度反馈的通气量控制工艺,混合物料的能量的可利用性和释放速度较快,在一次发酵阶段能够有效进行有机质的快速降解.灰分在整个堆肥过程中不发生变化,但有机质的减少导致物料干基中灰分含量的相对提高(图3).

合适的水分是保持微生物最佳活性的必要条件.高的水分含量减少了堆体的孔隙和增大气体传质阻力,造成堆体的局部厌氧;低的水分含量会抑制微生物活性<sup>[4,9]</sup>.同时,在一次发酵中,由于堆体的自产热作用,反应在高温状态下进行,进入堆体的空气经过堆体排入大气时能带走大量的水分,约90%的热通过水分蒸发的形式散失<sup>[5]</sup>.堆肥物料的含水率变化情况见图3:物料水分含量从最初的70.1%,经一次发酵完成时下降为47%;在二次发酵完成后,降低为32.4%.这说明大量的水分去除发生在一次发酵阶段,二次发酵的翻堆能加速堆体内饱和气体与周围大气的对流传质,从而带走更多的水分.

研究表明,富含纤维素和蛋白质的物料堆肥的最佳pH值为接近8.0,在 $pH \leq 5.0$ 时底物的降解速率几乎为0,在 $pH \geq 7.0$ 比 $pH \leq 6.0$ 时底物有更大的降解能力,在 $pH \geq 9.0$ 时底物的降解速率降低<sup>[10]</sup>.本次试验的物料中牛粪富含蛋白质,康乃馨富含纤维素,堆肥物料pH值在2d内迅速从初始的6.0升高到7.8,并一直保持在8.0左右,二次发酵完成后,产物的pH值维持在7.0左右(图3).这说明采用温度反馈的通风控制工艺可以保持堆体环境的最佳化,pH值在大部分时间处于最佳值,有利于物料的快速降解与稳定.然而,pH值的偏碱性可能会导致氨挥发而降低堆肥产品的肥料价值,在底物降解速率和产物养分含量之间需要综合考虑.

### 2.3 堆肥过程中各种氮形态的变化及氮素损失途径

堆肥中氮的各种形态包括总氮(TN)、有机氮(总氮减去无机氮)、无机氮(主要是氨态氮( $NH_4^+ - N$ )和硝态氮( $NO_3^- - N$ )),有机固体废物的堆肥可能导致氮素的矿化、氨气的挥发、硝化

及反硝化作用,其中氮素的矿化将有机氮转化为氨氮,氨气的挥发和反硝化作用直接导致了氮素的损失,堆肥过程中的氮含量及其存在形态的变化直接关系到最终堆肥产品的农业利用价值<sup>[2]</sup>.氮素的损失主要通过3个途径进行<sup>[11]</sup>:①高的pH值和高的堆肥温度造成的 $NH_3$ 逸出;②水溶性含氮成分随渗出水流失;③在缺氧条件下硝态氮反硝化引起的 $NO_x$ 挥发.本试验的水分控制较好,在堆肥过程中没有发现渗出水的产生,氮素不会通过这种途径损失.在一次发酵阶段,堆体处于40℃以上,硝化细菌无法生长,有机氮和氨态氮不会转化为硝态氮,反硝化损失的氮素只是物料初始成分里的硝态氮,而物料里硝态氮的初始含量只占总氮含量的很小部分(表1),因此反硝化不是氮损失的主要来源,氮素的损失主要是有机氮不断转化为氨态氮,氨态氮的累积引起 $NH_3$ 挥发造成的.

60d花卉废物和牛粪联合堆肥试验中物料氮素各种形态的变化见图4.从图4可以看出,在一次发酵初期总氮和有机氮含量急剧降低,这说明堆体内易降解物质丰富,微生物活动频繁,大量的有机氮快速转化为氨氮,氨氮的累积造成了pH值的快速升高(图3),同时堆体的持续高温加剧了氨态氮和 $NH_3$ 的不平衡,造成更多的 $NH_3$ 随着鼓入的空气逸出;而且,由于初期处于快速升温的考虑,鼓风量不足,造成堆体供氧不充分,在堆体内形成了大量的缺氧甚至局部厌氧状态,这直接导致剧烈的反硝化作用,大量的硝态氮转化为 $NO_x$ 挥发造成硝态氮的损失(图4);在氨态氮的累积和硝态氮的损失综合作用下,无机氮含量变化不大,甚至有所下降,这说明堆肥初期氨态氮的挥发和硝态氮的反硝化严重,这可能是局部供氧不足造成的.随着堆体进入高温期,通风量保持在较高水平(图2),有机质含量快速下降(图3),而氮素的损失却不明显(图4),说明合适的控制条件有助于减少氮素损失.值得注意的是,堆体进入高温期以后,氨态氮的含量有一个迅速的上升,然后快速回落,无机氮和硝态氮也有类似的趋势.对照

这一时段的温度和有机质变化(图 2,图 3)可以发现,在 0~5d,伴随温度的快速上升,有机质降解迅速,一旦温度进入灭菌期(近 70℃),有机质的降解几乎停滞,此时正是氨态氮上升的峰值,此后氨态氮迅速回落,这意味着灭菌期在有效杀灭致病菌的同时也抑制了其他有益微生物的降解活性;后来将温度控制在最佳降解范围内(50~60℃),有益微生物群落及其活性得到逐步有效地恢复,有机质的快速降解再次出现(图 2,图 3),直至一次发酵完成.二次发酵是

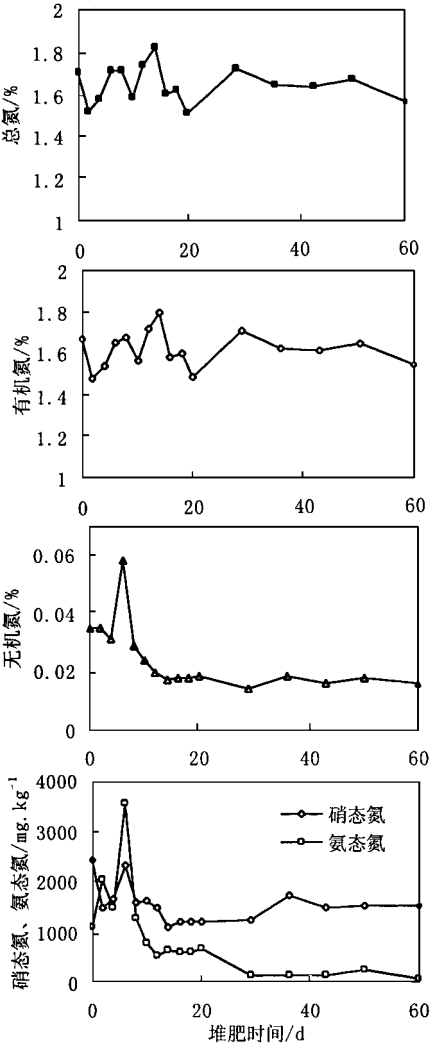


图 4 堆肥 60d 中总氮、有机氮、无机氮、硝态氮和氨态氮的变化

Fig.4 Changes of total nitrogen, organic nitrogen, inorganic nitrogen, nitrate-N and ammonium-N of piles during 60d composting process

在比较温和的条件下进行(60℃以下),微生物群落更加丰富,微生物生态系统进入良性循环,几乎没有氮素损失,此阶段由于硝化细菌的作用氨氮逐步减少,硝态氮逐步升高(图 4).

2.4 减少氮素损失途径的分析

通过控制物料初始水分和采用温度反馈的通气量控制工艺可以快速去除水分,杜绝渗出水带走含氮营养物;对通风进行有效控制,保持堆体内的氧浓度始终保持在较高水平,可以减少堆体内的局部厌氧,抑制反硝化的进行,减少硝态氮的损失;通过添加 C/N 高且吸附性能好的原料(如泥炭、锯末等)提高混合物料的 C/N 与吸附特性,可以减少  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在堆体内的累积及吸附较多的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,从而减少  $\text{NH}_3$  的挥发;添加酸性物质将堆料 pH 值调整到 7 左右,也可以减少  $\text{NH}_3$  的挥发.基于温度和营养物联合控制的堆肥过程控制工艺,再加上更精细的堆肥物料配比设计,有望有效减少堆肥过程中氮素的损失.

2.5 氨氮和硝氮作为腐熟度指标的讨论

采用的几种试验初始物料  $\text{NH}_4^+-\text{N} \geq 1000 \text{ mg/kg}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N} \leq 1 \text{ mg/kg}$  进行的堆肥腐熟度研究认为,  $\text{NH}_4^+-\text{N} \leq 0.04\%$ 、 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- \leq 0.16$  可以作为堆肥物料基本腐熟的指标<sup>[3]</sup>.本试验所用的初始混合物料的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为  $1071 \text{ mg/kg}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  为  $2426 \text{ mg/kg}$ (说明所选试验材料的硝酸盐含量较高,远大于国外相应数值),初始的  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  即为 0.1,小于所建议的 0.16.堆肥过程中  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  的变化经历了先上升然后逐步下降的过程,由于试验材料的硝氮含量较高,在堆肥的大部分时间内  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  的值均小于 0.16(图 5),这说明对于初始物料中硝氮含量高的堆肥试验,  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- \leq 0.16$  不能作为腐熟度的指标.对于本次试验而言,堆肥初始物料的 C/N 约 27.5(表 1),一次发酵阶段 pH 值大多在 8.0 左右,很容易造成  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  累积而转变为  $\text{NH}_3$  挥发,导致堆料  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的?续下降 2 9 天时,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为  $156.32 \text{ mg/kg}$ ,小于建议的 0.04%,而此时堆

体温度为 47.6℃且仍在上升(图 2),说明微生物活动仍比较频繁,故对于本试验  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 0.04\%$  也不适合作为腐熟度的指标.

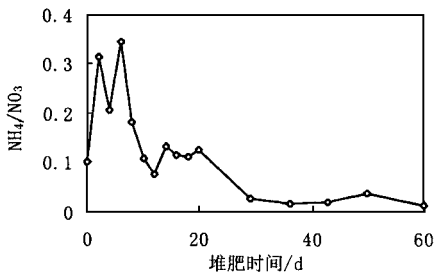


图 5 堆肥 60d 中  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  的变化

Fig.5 Changes of  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  of piles during 60d composting process

3 结论与建议

在花卉废物和牛粪联合堆肥过程中,堆体的水分、有机质、总氮量、有机氮量减少(损失)十分显著,主要的减少(损失)发生在一次发酵阶段,说明一次发酵采用温度反馈通气量控制的静态好氧堆肥技术进行花卉废物和牛粪的联合堆肥,可以实现有机底物的快速稳定和去除水分,同时也存在严重的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  累积引起的  $\text{NH}_3$  挥发和局部厌氧造成的反硝化作用,导致了氮素的累计损失达 41.98%,降低了堆肥产品的氮肥利用价值.综合考虑减少氮素损失和加快物料降解的因素对通风和温度进行更有效地控制,适当添加微生物可利用的 C 从而提高物料 C/N 及添加酸性物质有望减少 N 损失,这需要作进一步的研究.

参考文献:

1 Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic

household waste with different litter amendments II: nitrogen turnover and losses. *Bioresource Technology*, 2000, **74**: 125 ~ 133.

2 Tiquia S M, Tam N F Y. Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, 2000, **110**: 535 ~ 541.

3 Sánchez Monedero M A, Roig A, Paredes C, Bernal M P. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 2001, **78**: 301 ~ 308.

4 Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, USA, 1993.

5 MacGregor S T, Miller F C, Psarianos K M, Finstein M S. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Applied and Environmental Microbiology*, 1981, **41**(6): 1321 ~ 1330.

6 Stentiford EI. Composting control: principles and practice. In: De Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B, Papi T. *The science of composting. Part I*. London: Chapman and Hall, 1996. 49 ~ 59.

7 Fraser B S, Lau A K. The effects of process control strategies on composting rate and odor emission. *Compost Science & Utilization*, 2000, **8**(4): 274 ~ 292.

8 USEPA530-R-94-003. *Composting: Yard Trimmings, and Municipal Solid Waste*. 1994, USEPA.

9 Jeris J S, Regan R W. Controlling environmental parameters for optimum composting: moisture, free air space and recycle. *Compost Science*, 1973, **14**(2): 8 ~ 15.

10 Nakasaki K, Yaguchi H, Sasaki Y et al. Effects of pH control on composting of garbage. *Waste Management & Research*, 1993, **11**: 117 ~ 125.

11 Martins O. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology*, 1992, **42**: 103 ~ 111.